

Receptor Avanzado de Comunicaciones para Acceso Multiusuario Asíncrono

A. Pérez Neira, M.A. Lagunas, T. Vizcaíno*

Dept. Teoría de la Señal y Comunicaciones, ETSETB, Universitat Politècnica de Catalunya
30002, 08071 Barcelona (España), Tel.: 401 64 36 / 64 46, Fax: 401 64 47

E-mail: anuska@tsc.upc.es / miguel@tsc.upc.es

Abstract.- The use of digital antenna arrays to increase the efficiency of a communication link is studied. Specifically, a Time Reference Multi-beamformer/conformer system, is proposed. The goal is the simultaneous demodulation of BPSK-users, regardless their co-channel nature (in frequency and time). For this purpose, the proposed system resorts to the statistical independence of the impinging user signals and to the spatial diversity introduced by the array. A robust High Order Statistics Combiner will be developed. Its potential stands out in the presented simulations, which illustrate the good performance of the designed multiuser system both in the acquisition and tracking.

1. Importancia de la diversidad espacial en enlaces multiusuario.

Las técnicas de procesamiento digital de arrays presentan en la actualidad una buena opción como parte integrante en los terminales avanzados de comunicaciones: el control electrónico de la ganancia de cada antena permite crear de forma ágil diagramas de radiación/recepción adecuados a cada uno de los canales existentes en un sistema multiusuario.

En sistemas móviles vía satélite o móviles celulares, las técnicas de conformación de "haz" por referencia temporal [1] son las más adecuadas. Sin necesidad de conocer la posición del móvil, permiten la configuración adaptativa de cada diagrama según la solución de Wiener, presentando así una buena relación señal a ruido e interferencia (SNIR). La única exigencia de las técnicas de referencia temporal es la necesidad de enviar al sistema array una señal de referencia. Para evitar colisiones con otros posibles usuarios del sistema, dicha referencia será emitida dentro de un entramado preestablecido (entramado frecuencial o FDMA, entramado temporal o TDMA y entramado de código o CDMA).

Una vez el usuario ha sido identificado a través de su señal de referencia, el diagrama se conforma mediante un procesador de Wiener que rechazará espacialmente al resto de usuarios (etapa de adquisición). A continuación, en la denominada etapa de seguimiento, se reduce la secuencia de referencia con el fin de no bajar la eficiencia de la transmisión y es la diferente localización de cada usuario la que permite al receptor/transmisor identificar a cada uno de ellos. No obstante, la entrada de un nuevo usuario al sistema y los posibles cruces espaciales entre usuarios hace necesaria la existencia de un sistema de vigilancia que permita que los diferentes enlaces coexistan.

En este artículo se presenta un sistema de seguimiento robusto que no requiere envío alguno de señal de referencia y, por tanto, no afecta al rendimiento del enlace. Simplemente la independencia estadística de la información de cada transmisión será la que permita mantener separados (o identificados) constantemente a cada usuario. El trabajo también muestra cómo se puede utilizar dicha característica de independencia desde el inicio del enlace para emplear la diversidad espacial como una técnica más de múltiple acceso (SDMA, "Spatial Diversity Multiple Access"), que se añade con identidad propia a las ya existentes (FDMA, TDMA, CDMA). Es decir, el array es utilizado no sólo para garantizar las buenas prestaciones del enlace en seguimiento, sino también desde un inicio, en la primera etapa de adquisición.

Antes de describir en la sección 3 el sistema SDMA que se propone para enlaces BPSK, se expondrá en la siguiente sección el modo en el que la independencia estadística es utilizada para la identificación "ciega". Dicha identificación permitirá diseñar el diagrama de radiación/recepción sin necesidad de ningún tipo de entramado.

2.- Identificación ciega de usuarios.

En la sección anterior se ha introducido la necesidad de disponer de forma separada de la señal suministrada por cada usuario (identificación del usuario) sin que haya ningún conocimiento previo del canal de transmisión o de las formas de onda transmitidas, únicamente se dispone de medidas realizadas por una agrupación de sensores. La

* Este documento refleja parte del trabajo financiado por el CICYT, TIC-92-0800-C05-05.

problemática que se plantea se enmarca dentro de las técnicas de separación ciega de fuentes. Estas técnicas fueron iniciadas a mediados de los 80 independientemente por C.Jutten y Y.Bar-Ness [2,3] y, posteriormente, tanto su estudio como sus aplicaciones han ido adquiriendo un alcance cada vez mayor [4,5].

El problema se formula a partir de un vector x de NQ observaciones, resultado de la incidencia en los NQ sensores de NS señales estadísticamente independientes e, no gaussianas, ergódicas y de media cero. Dichas señales se han propagado previamente por un canal A . En el caso que nos ocupa, se trabajará con señales de banda estrecha muestreadas y trasladadas a banda base; por lo tanto, los procesos x y e serán complejos y discretos. La matriz A , de dimensión $NQ \times NS$, también compleja, no tendrá por qué considerarse estacionaria y contendrá en sus columnas los vectores de dirección de llegada a_i de cada una de las fuentes i

$$x(n)=[a_1(n) \ a_2(n)].e(n)=A(n).e(n) \quad (1)$$

El objetivo de las técnicas de separación ciega es el obtener la transformación lineal W que permita recuperar cada una de las formas de onda (2):

$$y(n)=[(w_1^H(n); \ w_2^H(n)).x(n)=W^H(n).A(n).e(n) \quad (2); \quad y(n)=P.D.e \quad (3)$$

Con dicho fin se impondrá la condición de independencia estadística sobre las componentes de y . Como tal identificación ciega, no impondrá condición ni sobre la ganancia en las salidas ni sobre el orden de las mismas. Es decir, si e posee componentes independientes también $P.D.y$ las tendrá, pero cualquier matriz de permutación P y cualquier matriz diagonal regular D . En definitiva, se ha de buscar una matriz W tal que cumpla (4)

$$W^H.A=P.D \quad (4)$$

Si la matriz A contiene las direcciones de llegada de cada una de las ondas, el objetivo de dicha ecuación (4) será el de *anular* determinadas direcciones espaciales.

Estrictamente considerada, la condición de independencia se impone sobre las funciones de densidad de probabilidad [4,5]. No obstante, la mayoría de técnicas existentes trabajan sobre funciones de coste simplificadas que se formulan conjuntamente en función de estadísticas de orden dos y superiores (HOS). Las estadísticas de segundo orden no permiten determinar $W^H.A$ más allá de una transformación unitaria (ortogonalización o blanqueo de datos), mientras que la condición de independencia estadística supondrá realizar una rotación de los datos [6] consiguiendo así el objetivo formulado en (4). El problema de trabajar con estadísticas de orden superior es el manejo de funciones de coste complejas, que pueden no siempre converger a la solución deseada para separar las fuentes.

Nuestra propuesta consiste en aprovechar las características concretas del escenario de comunicaciones a tratar y obtener una función de coste, que aunque basada en estadísticas de orden superior, sea sencilla y permita ser maximizada o minimizada con técnicas de gradiente. Se optará por un algoritmo de separación inspirado en los originales de Y.Bar-Ness y C.Jutten: diseñados sobre arquitecturas neuronales dirigidas por aprendizajes ágiles. Las estadísticas de orden superior trabajarán directamente sobre los datos medidos, sin necesidad de imponer condiciones adicionales sobre las estadísticas de segundo orden o de realizar pasos previos de blanqueo o decorrelación de los datos. De este modo se pretende ganar en sencillez de cálculo y en robustez frente a la contaminación de ruido gaussiano.

2.1.- Función de coste propuesta

En el escenario a tratar se considera la presencia de dos usuarios con igual modulación BPSK. Las mediciones se realizarán con un número de sensores superior al número de usuarios, de este modo se mejorarán las prestaciones de la red frente al ruido, tiempo de convergencia y resolución espacial. Tal y como puede observar el lector, la red de separación propuesta en la figura 1 presenta una estructura "feed-forward", derivada de la inicialmente diseñada por Y.Bar-Ness. Como función de coste que rijan el diseño de los pesos, el imponer incorrelación entre las salidas de la red es insuficiente [3] y se propone anular el cumulante de cuarto orden cruzado de las mismas (5):

$$\Phi = cum(|y_1|^2 |y_2|^2) = |w_1^H.a_1|^2 |w_2^H.a_1|^2 k_1 + |w_1^H.a_2|^2 |w_2^H.a_2|^2 k_2 \quad (5)$$

Debido al carácter negativo de la *kurtosis* de las señales BPSK, k_i , la función de coste Φ es negativa y sus ceros coincidirán con sus máximos. No obstante, la maximización de la función de coste Φ es una condición necesaria pero no suficiente para la independencia estadística de las salidas y ; por tanto, se hace necesario estudiar si los ceros de dicha función garantizan la separación de las fuentes. De todas las posibles soluciones que hacen $\Phi=0$, no son soluciones de interés:

- a.- la solución trivial $w_1=0$ y/o $w_2=0$;
- b.- las soluciones $|w_1^H \cdot a_1|=0$ y $|w_1^H \cdot a_2|=0$
ó $|w_2^H \cdot a_1|=0$ y $|w_2^H \cdot a_2|=0$

Las soluciones presentadas en (a) se evitarán imponiendo la maximización de Φ con la condición de unidad sobre los pesos w_{11} y w_{2NQ} :

$$\max\{\Phi\} \text{ con la condición } w_1^H \cdot 1_1 = 1 \\ w_2^H \cdot 1_{NQ} = 1 \quad (6)$$

En lo que respecta a las soluciones expuestas en (b), estas hacen cero el determinante del Hessiano de la función Φ , y, empíricamente se comprueba que no son soluciones estables en el algoritmo de gradiente que se expone a continuación.

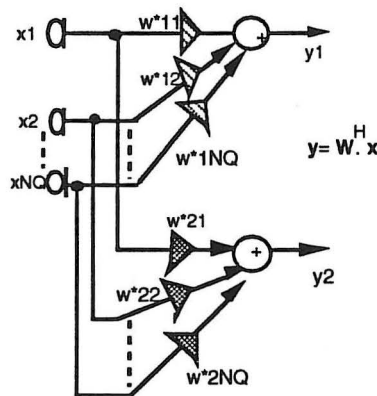


Figura 1. Red de separación W propuesta con estructura feed-forward.

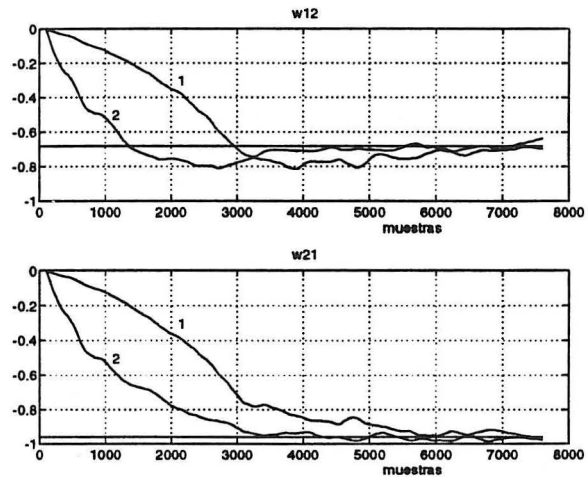


Figura 2. Red de separación de dos fuentes (SNR=5 dB) con 2 sensores. Convergencia de los pesos a la solución óptima con diferentes pasos de adaptación: 1) $\mu_{inorm} = \alpha/E\{x^H x\}^2$; 2) la expresión formulada en (8).

2.2.- Algoritmo adaptativo.

Al calcular los puntos críticos de Φ ($\Delta_{w_i} H(\Phi) = 0$) se verifica que los ceros de dicha función son los únicos valores extremos máximos, y por tanto, globales. Se decide, por tanto, aplicar técnicas de gradiente, siendo entonces el cálculo de los pesos el indicado en (7):

$$w_i(n+1) = w_i(n) + \mu_{inorm} \Delta_{w_i} H(\Phi); \quad i, j = 1, 2 \text{ con } i \neq j \quad (7)$$

en donde $\Delta_{w_i} H(\Phi) = \text{cum}\{x y_i^* \cdot |y_j|^2\}$ es estimado ergódicamente, realizando las medias temporales con una ventana exponencial. El valor del paso de adaptación μ_{inorm} es una aproximación a su valor exacto (8) y es calculada para garantizar una convergencia lo más

$$\mu_{inorm} = \alpha / \text{cum}\{x^H x \cdot |y_j|^2\} \approx \alpha / E\{x^H x \cdot |y_j|^2\} \quad (8)$$

independiente posible de la potencia de las señales. La figura 2 ilustra la mejora que ofrece el empleo de dicho paso de adaptación.

No obstante, tal y como muestran las figuras 3 y 4, el carácter aproximado de μ es el causante de que un aumento tanto en el número de sensores como en la SNR siga influyendo positivamente en la mejora de la convergencia. Dichas gráficas, realizadas en un entorno

difícil (baja SNR y fuentes cercanas) comparan el mejor comportamiento de la red de separación al pasar de 2 a 8 sensores. Las figuras 3.a y 4.a muestran el diagrama de recepción de la red considerando sólo una de sus dos salidas (w_1^H). En ellas se puede observar la mayor resolución del diagrama y mejor SNR con el incremento del número de sensores.

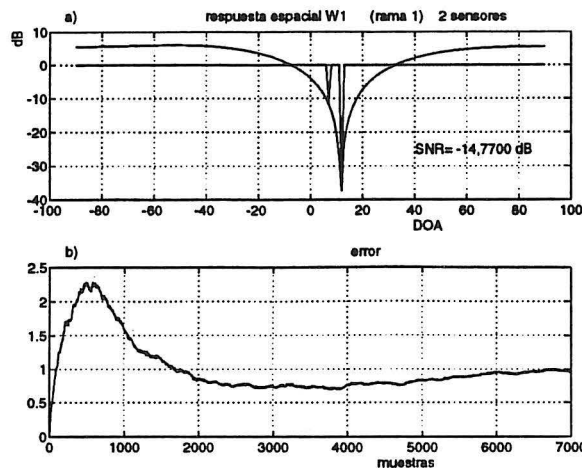


Figura 3. Escenario: 2 fuentes (SNR=2 dB, elevación 7° y 12°), array lineal de 2 sensores; $\alpha=0.01$

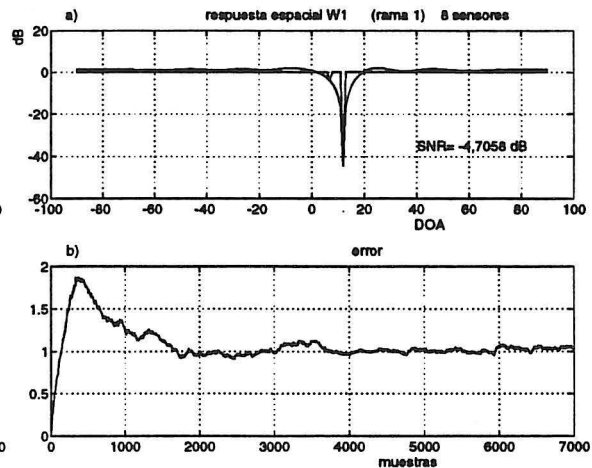


Figura 4. Escenario 2 fuentes (SNR=2 dB, elevación 7° y 12°), array lineal de 8 sensores; $\alpha=0.01$

Las figuras 3.b y 4.b muestran las curvas del error cuadrático medio $E\{|y_i - e_i|^2\}$, siendo e_i la fuente superviviente en la salida i . En ellas se aprecia claramente la mejor convergencia y estabilidad de la red de 8 sensores.

Cabe destacar que, a pesar de que el algoritmo trabaja únicamente con cumulantes de cuarto orden, "ciegos" al ruido gaussiano, la SNR influye en el comportamiento del algoritmo. Es cierto que la solución teórica propuesta en (7) presenta un comportamiento robusto frente al ruido, ya que no emplea en ningún momento estadísticas de orden dos. No obstante, en la práctica se ha de tener en cuenta que las estadísticas no son estimadas con un número infinito de muestras en situación estacionaria, ello provocará un error (sesgo y varianza) que se incrementa en presencia de ruido.

En definitiva, la red de separación de la figura 1 se puede interpretar como un combinador espacial con aprendizaje HOS, que realiza mejor filtrado espacial cuantos más sensores utilice. La característica más atractiva de dicho conformador es su invulnerabilidad frente a colisiones espaciales entre usuarios; ya que ello no infringe la independencia estadística en la que se fundamenta la red de separación. Sin embargo [7], la respuesta espacialmente plana del conformador (figura 3.a, 4.a) confirma que al ser una red "ciega" al ruido no es capaz de filtrarla a su salida. Por dicho motivo se propone en la siguiente sección la cooperación de la red de separación diseñada con conformadores de Wiener óptimos que, a partir de las señales de referencia separadas, sean capaces de mejorar la SNR de cada enlace.

3. Sistema de referencia temporal multiusuario.

En esta sección se considerará un entorno no estacionario en el que, debido a la alta densidad de usuarios, se presenta una alta probabilidad de colisión entre dos comunicaciones diferentes en el mismo "slot" tiempo-frecuencia. La diversidad espacial ayudada por la información adicional de independencia estadística entre usuarios, es la clave que permitirá adquirir y mantener múltiples enlaces sin que la colisión, incluso a nivel espacial, entre usuarios ponga en peligro las comunicaciones simultáneas.

En la arquitectura que se propone, los dos conformadores de Wiener, dedicado cada uno a un usuario, coexisten junto con la red de separación. La red de separación identifica a cada usuario y suministra la señal de referencia adecuada para que cada conformador sea capaz de:

- o bien conformarse inicialmente hacia un usuario diferente,
- o bien seguir las variaciones del canal, evitando que el sistema se venga abajo aunque se den situaciones críticas en donde haya cruce de las trayectorias de los rayos recibidos.

En la figura 6 se muestra el comportamiento del receptor propuesto completo frente al escenario mostrado en la gráfica 5. Una vez transcurridos 2000 símbolos, se considera que la red de separación ha convergido y se utilizan sus salidas, (limpias de ruido por un demodulador BPSK) para diseñar los conformadores óptimos hacia cada uno de los dos usuarios (dirigidos por el algoritmo NLMS). Las curvas de error instantáneo y los haces conformados finales (haz_1, haz_2) muestran como, aunque en el cruce de trayectorias (3700 símbolos) se pierden los conformadores, estos se vuelven a recuperar hacia cada usuario con buena SNR gracias al constante seguimiento que la red de separación a hecho de los mismos.

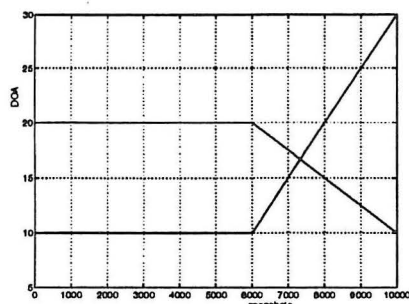


Figura 5. Escenario de la simulación en figura 6: movimiento de las fuentes (BPSK, 2 muestras/simb., SNR= 9 dB)

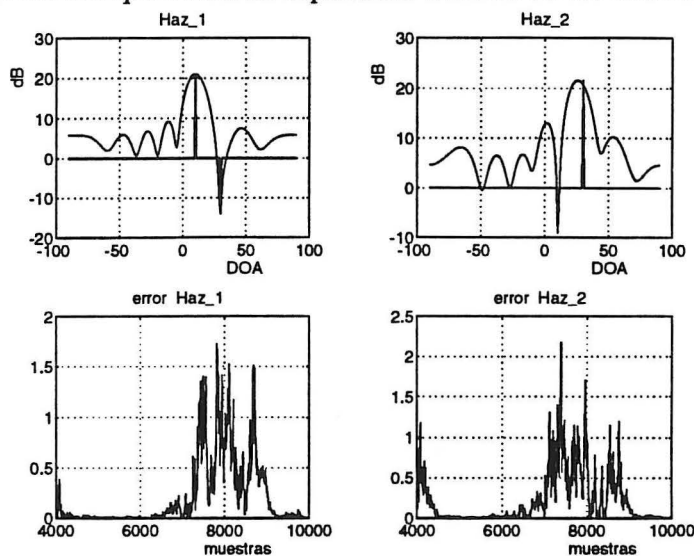


Figura 6. Conformadores de Wiener enfocados a cada usuario en el escenario mostrado en la figura 5. La referencia es proporcionada por la red de separación HOS; SNR₁= 18.5 dB, SNR₂= 17.5 dB

4.- Conclusiones

El problema de demodulación simultánea de múltiples usuarios que comparten igual canal y modulación se ha resuelto a través de una arquitectura de dos etapas que utiliza la característica de independencia estadística entre usuarios desde el inicio del enlace. De este modo, esta arquitectura emplea la diversidad espacial como una técnica más de múltiple acceso (SDMA, "Spatial Diversity Multiple Access"), que se añade con identidad propia a las ya existentes (FDMA, TDMA, CDMA). Es decir, sin necesidad de ninguna técnica de entramado en tiempo, frecuencia o código, el array garantiza buenas prestaciones del enlace tanto en adquisición como en seguimiento. El éxito de la arquitectura depende en gran medida del algoritmo de identificación ciega, que, a diferencia de los existentes en la literatura [4,5,6], se beneficia del empleo de mayor número de sensores que de fuentes. Actualmente se está trabajando en agilizar su convergencia, con el fin de poder utilizar el sistema en entornos móviles más rápidos.

Referencias:

- [1] R.T. Compton, "An adaptive array in a spread communication system", ASSP. Trans. IEEE., vol 66, No. 3, pp 289-298, March, 1978.
- [2] C.Jutten, J.Herault, P.Comon, E. Srouchyari, "Blind separation of sources", Part (I,II,II), Signal Processing 24, pp. 1-29, Elsevier 1991.
- [3] Y. Bar-Ness: "Bootstrapping adaptive interference cancellers: some practical limitations", Globcom 1982, pp. 1251-55.
- [4] P.Comon, "Independent Component Analysis, A new concept?", Signal Processing 36 (1994), pp.287-314
- [5] O.Shalvi, E.Weinstein, "New Criteria for Blind Deconvolution of Nonminimum Phase Systems (Channels)", IEEE Trans. on Information Theory, vol. 36, no.2, March 1990.
- [6] J.F. Cardoso, A. Souloumiac, "Blind beamforming for non-Gaussian signals", IEE Proc-F vol.140, no 6. December 1993.
- [7] A.Pérez-Neira, M.A. Lagunas: "Simultaneous multiuser demodulation based on digital array processing", VII European Signal Processing Conference EUSIPCO 94.